

多角度耦合分幅相机光学系统设计

张天舒^{1,2}, 金光^{1*}, 刘春雨¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为实现高速相机的分幅功能,本文提出一种采用多角度耦合分幅方式的高速相机光学系统。该系统分幅结构采用多组相同的光学系统,在平行于物面的圆周上均匀分布,分别从不同角度拍摄同一物面,在保证各组系统的物方视场相同的情况下,每组光学系统的光轴与物平面的夹角均相同,通过优化设计得到全视场的最佳成像。根据需求,使用光学设计软件设计了多角度耦合四分幅成像中长焦光学系统并绘制三维立体仿真模型,分析了每组像面像质、照度以及畸变等相关参数,调制传递函数 MTF 在频率为 50 lp/mm 处不低于 0.5, F 数为 2, 畸变小于 0.4%, 相较于常用的棱镜和反射棱锥分光方式,无需额外分光结构,像面照度提高 4 倍以上。结果表明成像质量理想,分幅相机系统各像面所成像一致性高。

关键词: 光学设计;分幅相机;高速摄影

中图分类号: 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20181104.0615

Optical system design of multi-angle coupled framing camera

ZHANG Tian-shu^{1,2}, JIN Guang^{1*}, LIU Chun-yu¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: jing@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to realize the framing function of high-speed cameras, we proposes a high-speed camera optical system using multi-angle coupled framing methods. The framing structure uses multiple groups of the same optical system and is evenly distributed on the circumference parallel to the object plane. The same object surface is photographed from different angles. Each group is guaranteed to have the same object field of view. The angle between the optical axis of the optical system and the object plane is the same, and the best imaging of the entire field of view is obtained through optimization design. According to the requirements, a telephoto optical system in multi-angle-coupled quadrant imaging is designed using optical design software and a three-dimensional simulation model is drawn. The image quality, luminance, distortion, and other relevant

收稿日期:2017-11-26;修订日期:2018-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61503360)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61503360)

parameters of each group are analyzed, and at a frequency of 50lp/mm, the modulation transfer function (MTF) is not less than 0.5, the F number is 2, and the distortion is less than 0.4%. Compared with the commonly used prism and reflective pyramidal spectroscopy, the surface illumination can be increased by more than 4 times without additional splitting structure. The results show that the imaging quality is ideal and the image formation consistency of the image planes of the framing camera system is satisfied.

Key words: optical design; framing camera; high-speed photography

1 引 言

人眼具有视觉暂留特性,其限制了人们观察和分析高速运动过程,因而各种类型的高速摄影仪器应运而生^[1-2]。高速摄影是研究高速运动过程的有效方法,在各个领域都有广泛应用^[3-5],它具有高时间分辨率,能跟踪快速变化过程。高速相机大致分为以下几类:间歇式高速摄影机、光学补偿式高速相机、鼓轮式高速相机、脉冲光源多幅高速相机、转镜式高速相机、网格式高速相机、克尔盒高速相机、高速全息摄影机以及变相管高速相机等^[6-7]。早期的高速相机大多不能较好地解决高速响应和高灵敏度二者之间的矛盾。应用像增强器的高速数字分幅相机弥补了以上缺陷,时间和空间分辨率高,光增益可调,光谱范围宽,信息处理功能丰富。

各发达国家早已开展这方面的研究,并达到相当高的水平,而且已经实际应用于科学技术研究领域。如德国 PCO 公司 HSFC pro 超高速像增强型分幅相机,美国斯坦福计算机光学公司 XX Rapid Frame 多通道高速相机,以及美国 CORDIN 公司 MODEL 214-8 和 MODEL 222-4G 等,最短曝光时间可以达到 0.2 ns,帧间时间间隔最小可达 0.02 ns。国内有很多研究机构也开始研制超高速数字分幅相机,主要包括深圳大学、西安光学精密机械研究所、北方夜视技术股份有限公司、杭州浙大滨松光子科技有限公司及天津市天隆科工贸开发总公司等。但是这些高速相机普遍具有时间分辨率低、空间分辨率低、动态范围小等缺点,与国外相机相比性能较差,难以实现较高质量的分幅摄影。因此,在需要超高速摄影的科学研究领域,国内相机的性能难以满足需求,其应用受到限

制。

分幅光学系统是高速相机成像系统的重要形式,目前常用的分幅机构有棱锥反射镜和棱镜分束镜等。当所需分幅数量较多时采用棱锥分光方式,分幅数量较少时采用分光棱镜分光方式。棱锥反射镜分光方式是棱锥置于光学成像系统孔径光阑处^[8-10],每个视场的入射光孔径被均分为几等份(取决于棱锥的棱数),棱锥的顶点则必须严格位于成像系统的出瞳处,否则所成像会有不同程度的渐晕现象。棱锥的光学元件加工难度大,多路光学元件加工及性能要求一致性高,系统装调较为复杂,安装准确性要求较高。分光棱镜分光方式多采用多组 1:1 分光棱镜的空间布局,实现多幅分光功能。这种方式有效避免了在分光的同时对物体像的分割,即各组系统的像面所得像都是一致的^[11-12]。但是以上两种方式都存在相同的问题,高速相机的曝光时间极短,若要使最后的曝光量保持在一定水平,则像面照度就要得到相应保证。这两种方式都是将入射系统的能量进行分割,分幅数量越多,到达每个接收器的能量就越少,尤其是棱镜分光的方式,棱镜本身就会对光有一定吸收,在很大程度上影响成像质量。而在弱光环境下,这种结构不利于对实验现象的观察。

另外,还有一种分幅系统,其使用多组相同物镜,采用圆心一组,圆周均匀分布多组的方式平行排布于圆周上的物镜^[13],其像面接收器相对物镜轴心平移离轴,以获得与圆心物镜相同的物面图像。这种方式弥补了前述分幅方式能量分割的缺陷,但是由于该系统各组物镜光轴平行,各系统的实际物方视场比所需物方视场的范围更大,即加大了物方视场,在一定程度上为光学设计带来了难度。

针对以上问题,本文提出一种多角度耦合分幅相机光学系统,通过调整物镜光轴与物面和像面的夹角,同时对光学系统的像差进行校正,使得每幅图像基本一致,以增加接收器接收到的能量,实现了高速相机的分幅功能,同时也保证了成像质量。

2 设计原理

2.1 镜组间结构布局

由于各组系统的光轴与物面成一定角度,且镜头有一定的孔径,因此需要安排合适的角度并且使光学系统的像质达到较高水平,同时使各组系统机械结构能够安排得当。在外部机械结构能够合理安排的情况下,倾斜角度越小,像差校正越容易,像质越好。

设物面中心与各组镜头第一片透镜前表面距离为 L ,第一片透镜直径为 D ,光轴与物面垂线夹角为 γ 。如图 1(a)所示,物面中心在 A 点,4 个物镜的第一片透镜中心分别在 B 、 C 、 E 和 F 4 个点上,形成一个正四棱锥。根据几何关系可得:

$$L \cdot \sin\gamma = \sqrt{2}L \cdot \sin\theta, \quad (1)$$

$$\sin\theta = \frac{\sqrt{2}}{2}\sin\gamma, \quad (2)$$

式中, θ 为相邻两个透镜的光轴之间的夹角。在棱锥的一个侧面上,可以提取他们之间的几何关系,如图 1(b)所示。为了保证 B 和 C 这两个透镜彼此没有重叠部分,则 θ 必须满足以下条件:

$$\sin\theta \geq \frac{\frac{1}{2}D}{\sqrt{L^2 + \frac{1}{4}D^2}}, \quad (3)$$

即 γ 需满足条件:

$$\sin\gamma \geq \frac{\sqrt{2}D}{\sqrt{4L^2 + D^2}}. \quad (4)$$

当物面与透镜面(假设为薄透镜)成一定角度,可以通过调整像面的角度来得到整个物平面的清晰的像^[14]。当被摄物体、像平面和透镜平面这三个面的延长面相交于一条直线时,即可得到

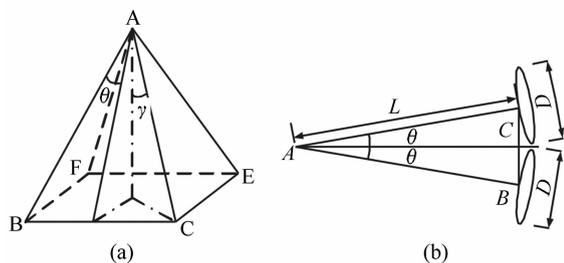


图 1 (a)物点与 4 个系统的立体结构;(b)相邻两个系统的几何关系

Fig. 1 (a) Structure of the object point and four systems; (b) geometrical relationship of two adjacent systems

全面清晰的影像。这样,当物面与透镜面成一定角度的时候,只需要调整像面的角度,即可得到整个物面清晰的像。如图 2 所示。

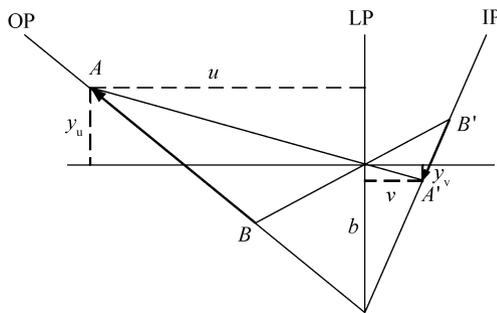


图 2 沙姆定律几何证明

Fig. 2 Geometric proof of the Scheimpflug principle

规定物距 u 和像距 v 都为正,即 u 以镜面 LP 为基准向左增加。而垂轴方向则是光轴以上为正,以下为负。在二维空间中,倾斜的物面 OP 可以表示为 $y_u = au + b$ 。物距、像距和焦距之间的关系由薄透镜公式给出:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

式中, f 为薄透镜的焦距,则

$$y_u = a \frac{vf}{v-f} + b. \quad (6)$$

放大率可以用像高 y_v 和物高 y_u 之比 m 来表示,即

$$m = \frac{y_v}{y_u}, \quad (7)$$

也可以用像距和物距之比来表示,取相反数,即

$$m = -\frac{v}{u} = -\frac{v-f}{f}. \quad (8)$$

将上面式(6)、(7)和(8)联立,得

$$y_v = -(a + \frac{b}{f})v + b. \quad (9)$$

式(9)中可以看出,物面 OP: $y_u = au + b$ 上的点所成像都在像面 IP: $y_v = -(a + \frac{b}{f})v + b$ 上,而这两条直线的交点在透镜面上。因此可以得出像面 IP 与物面 OP 的交线在透镜面 LP 上,即物面、透镜面与像面交于一条线。

因此,通过物面与镜面之间的角度和距离关系,得到能使倾斜物面成清晰像的像面角度,这样就能在一定程度上解决物面与光轴不垂直所带来的像差校正问题。

然而实际镜头并不能简单地看作是薄透镜,尤其是当透射式光学系统的焦距较长的时候,整个系统的长度更是不能忽略,因此可以根据光轴倾斜的角度,计算出相应像面的倾斜角度,然后结合具体的光学系统来优化调整角度。

2.2 光轴倾斜引起的轴外像差和像面照度差异分析

除了物面和像面尺寸引起的轴外点所成像照度差异外,由于光轴倾斜导致的物面上关于物面中心对称的物点在像面所成相应像也会有所不同。图 2 中,尽管点 A' 和 B' 分别是点 A 和 B 的清晰像,但是由于物距和像距的不同,二者的横向放大率也不相同。同一物体的像在不同区域放大率不同,必然会导致所得像有畸变。畸变虽然不影响成像的分辨率,但是此种畸变会导致各个分幅像面的畸变位置不同,进而导致各分幅不一致。对于一般的成像光学系统,只要畸变不大于 4%,就对像质没有影响。对于观察快速变化过程的高速相机,一般要求畸变控制在 0.5% 以内。

光源发出的光通量投射到某一表面时,该表面被照明。在某一微小面积上投射的光通量与该面积的比值称为该面积上的光照度。光照度与光源发光强度成正比,与光源到被照面的距离平方成反比,而在光学设计中更重要的是,轴外像点的

光照度随视场角余弦的四次方而降低^[15]。如果轴外成像光束有渐晕,那么还需要再乘以渐晕系数。也就是说,视场越大,边缘视场的像面照度就会越低。对于摄影系统,当半视场为 20° 时,视场边缘照度为中心的 78%, 此时像面的照度差异不会对成像质量有太大的影响。另外本设计中各个系统的拍摄角度不同,物面上同一位置在各个像面上对应像点的照度也是不同的。而对于用于记录物面照度快速变化的高速相机,不同分幅像面过大的照度差异会对实验结果造成影响。因此,物面同一位置在各个像面上对应像点的照度差异应不大于 1%, 同一像面各视场照度差异应不大于 5%, 才能保证各分幅像面所成像的一致性。

3 多角度耦合分幅光学系统设计实例

3.1 单组物镜光学系统设计

本设计中物镜由八片透镜构成,物方视场半径为 150 mm,像方视场半径为 20 mm,系统焦距长,口径大,不完全同轴。根据系统特点初步选定了匹兹瓦结构进行扩展。轴外像差与色差是系统优化的重要部分,系统中的双胶合透镜能够消除部分色差。为尽可能降低材料成本,八片透镜的材料分别为 H-QK3L、QF5、H-QK3、H-F13、H-ZF7LA、H-K51、ZF51、ZF50 和 H-ZBAF3,所有透镜材料均选用成都光明玻璃库中的普通玻璃,理化性能稳定,价格适中。单组物镜的二维轮廓图如图 3 所示。

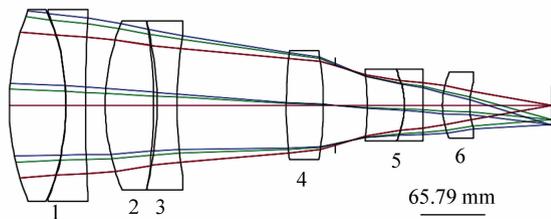


图 3 单组物镜二维轮廓图

1. 双胶合透镜一, 2. 凸透镜一, 3. 凹透镜, 4. 凸透镜二, 5. 双胶合透镜二, 6. 弯月透镜

Fig. 3 2D layout graph of single group of objective

1. double glude lens, 2. convex len, 3. concave len, 4. convex len, 5. double lude lens, 6. meniscus len

3.2 分幅系统结构设计

多角度耦合四分幅相机光学系统结构图如图4和图5所示。首先通过计算得出光轴的大致偏角。根据公式(4)可以计算出各组光学系统的光轴与物平面中心垂线的夹角 γ 的最小值为 2.48° 。而实际上在相邻两组系统之间需要有一定的间隔留给镜筒和其他支撑结构,再使用CODEV和LightTools进行优化和仿真,确定光轴与物面垂线夹角为 3.5° ,即物面中心垂线(Z 轴)与结构1和2的光轴在 XOZ 平面分别成 3.5° 和 -3.5° ,与结构3和4的光轴在 YOZ 平面分别成 3.5° 和 -3.5° 角度,各个结构光轴分别与各自像面垂线夹角约为 0.48° 。像面发出的光分别进入4组物镜系统中,同时在4个带有MCP的CCD上成像。通过电子快门控制4个像面的曝光时间和曝光时序,可以捕捉快速变化的过程和快速运动的物体的运动轨迹,从而满足高速相机的要求。



图4 多角度耦合四分幅光学系统结构主视图

Fig.4 Front view of multi-angle framing camera

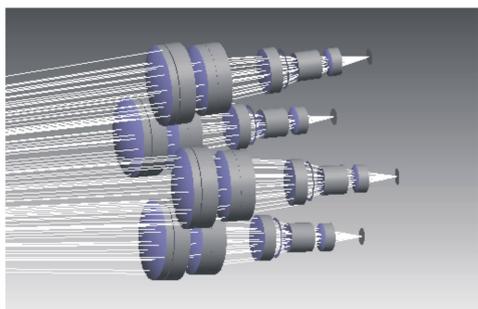


图5 多角度耦合四分幅光学系统结构立体视图

Fig.5 Stereoscopic view of multi-angle framing camera

3.3 系统主要性能分析

图6、图7、图8和表1分别显示了多角度耦

合分幅相机光学系统的主要性能:调制传递函数(MTF)、场曲、畸变以及相对照度。

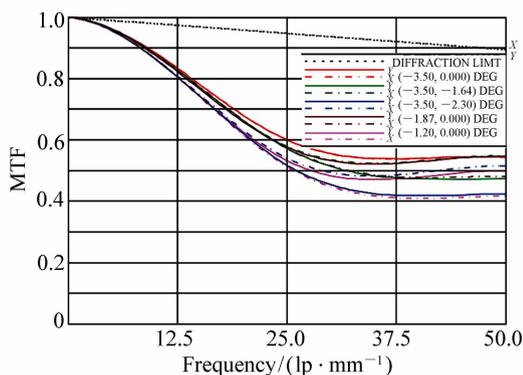


图6 系统 MTF 曲线图

Fig.6 Curve diagram of MTF

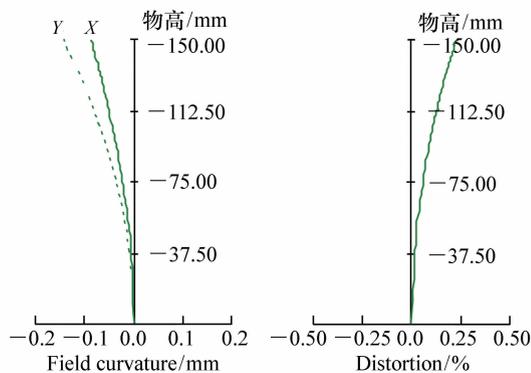


图7 场曲和畸变性能

Fig.7 Field curvature and distortion

多角度耦合分幅相机系统的单组物镜焦距为 350 mm , F 数为 2 ,主要工作波段为 $486\sim 656\text{ nm}$,调制传递函数(Modulation Transter Function, MTF)在频率为 50 lp/mm 时达到了 0.5 。

MTF是评价光学系统的最普遍且有效的方法,它反映了成像的对比度和分辨率,能够较为综合地评价光学系统的总体性能。系统的MTF如图6所示。4个分幅的MTF曲线非常一致(因此只给出其中一个结构),其在 50 lp/mm 处MTF值优于 0.5 ,说明系统的光学性能较好。本设计将用于高速分幅相机中,分幅是系统设计的关键,因此各个像面的一致性也是重要的评价指标。系统的场曲和畸变在图7和图8中给出。从图7中可以看出,系统的最大畸变不超过 0.4% ,形变量非常小,能够满足分幅系统对像面一致性的要求。

图 8 中所示为 4 个分幅像面的畸变网格图,黑色网格是无畸变的理想均匀网格,红色的是经过系统后像面所成的实际网格。从图 8 中可以直观看出,4 个像面的畸变位置主要都在远离物体的方

向上,但是对于各个像面所成的像的畸变位置对应的物面上的位置并不相同,因此小的相对畸变和相对照度差异对于本系统至关重要。

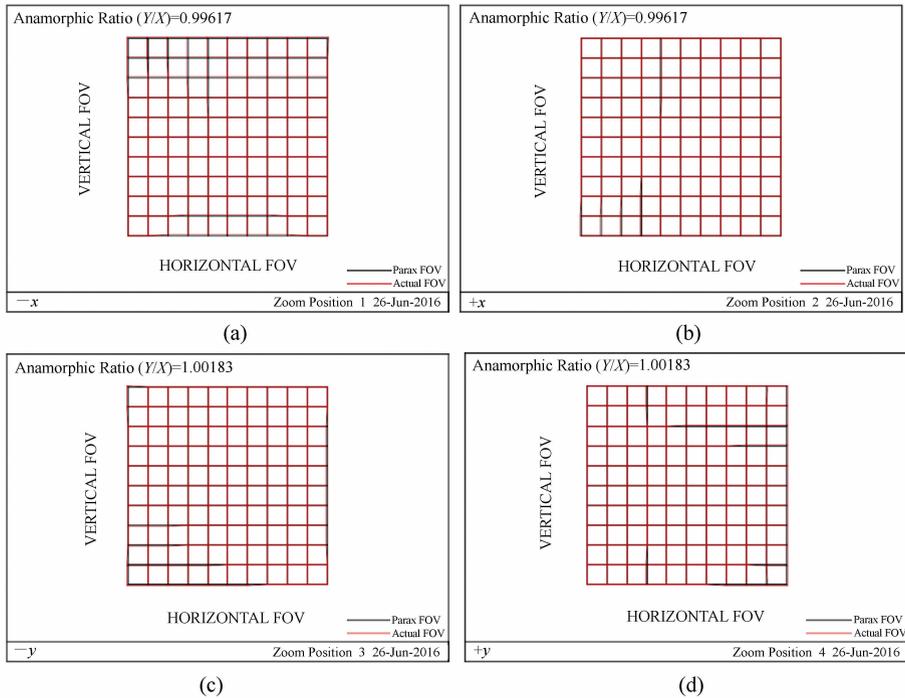


图 8 (a)、(b)、(c)和(d)分别为结构 1、2、3 和 4 的畸变网格图

Fig. 8 (a), (b), (c) and (d) are the distortion grid figures of configuration 1, 2, 3 and 4 respectively

表 1 给出了各个分幅在以各自视场中心为起点分别沿 $+X$ 、 $-X$ 、 $+Y$ 和 $-Y$ 方向到视场边缘相对照度值,也是该方向相对照度最低的值,视场中心照度为 1。从表中数据分析可知,各分幅像面边缘视场相对照度最大值和最小值分别为

97.6% 和 97.0%,与中心视场的照度差异最大不超过 3%,而同一物点在各分幅像面相同位置的照度差异最大不超过 0.6%。每个像面自身照度均匀性高,各像面照度差异小,满足系统对各分幅成像一致性的要求。

表 1 各个分幅像面在不同视场的最小相对照度

Tab. 1 The minimum relative illuminance of each segmented image surface in differend fields of view

结构	扫描方向			
	$+X$	$-X$	$+Y$	$-Y$
1	0.973	0.973	0.970	0.976
2	0.973	0.973	0.976	0.970
3	0.976	0.970	0.973	0.973
4	0.970	0.976	0.973	0.973

综合考虑这几种光学系统的评价方式可知,本系统具有较高的分辨率和对比度,同时具有极

小的畸变以及非常均匀的像面照度,符合分幅光学系统各分幅像面成像一致性的要求。因此本系

统具有较好的光学性能。

4 结 论

本文设计了一种多角度耦合四分幅相机,采用4台光轴与物面中心垂线夹角相同的相机从4个中心对称的位置拍摄同一个物面,得到同一物体的4个相同的像,满足高速分幅相机的分幅要求。光学系统的 F 数为2,成像谱段为可见光谱

段,系统在50 lp/mm 频率下的MTF不小于0.5,各个分幅像面最大畸变小于0.4%,同一像面不同视场相对照度差异不大于3%,相同物点在各个结构的像面照度差异不超过0.6%。由于没有对单个入射系统光能进行分割的分光结构,相较于采用棱镜或反射棱锥进行分光的系统,最后像面照度提高了至少4倍。系统加工装调相对简单,材料成本低,同时系统的光学性能较好,分幅一致性高,在工程中具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京:科学出版社,1990.
TAN X X. *Test Technique for Optical High Speed Photograph*[M]. Beijing:Science Press,1990. (in Chinese)
- [2] 谭显祥. 高速摄影技术[M]. 北京:原子能出版社,1990.
TAN X X. *Technique for High Speed Photograph*[M]. Beijing:Atomic Energy Press,1990. (in Chinese)
- [3] 蔡厚智,龙井华,刘进元,等. 无增益微通道板皮秒分幅技术研究[J]. 红外与激光工程,2015,44(S):109-112.
CAI H ZH, LONG J H, LIU J Y, *et al.*. Non-gain microchannel plate picosecond framing technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S):109-112. (in Chinese)
- [4] 张承忠,叶邦彦,赵学智,等. 用于提琴琴弦三维振动测量的高速摄影系统[J]. 光学精密工程,2014,22(9):2329-2336.
ZHANG CH ZH, YE B Y, ZHAO X ZH, *et al.*. High-speed photographic system for 3D vibration measurement of violin string[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2329-2336. (in Chinese)
- [5] 白晓红,白永林,刘百玉,等. 神光原型诊断设备:门控针孔分幅相机的研制[J]. 光学精密工程,2011,19(2):367-373.
BAI X H, BAI Y L, LIU B Y, *et al.*. SG diagnostic equipment: Gating pinhole framing camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):367-373. (in Chinese)
- [6] 李先朱. 间歇式高速摄影机的分辨率[J]. 光子学报,1997,26(12):1130-1134.
LI X ZH. Resolution of the intermittent high speed camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(12):1130-1134. (in Chinese)
- [7] 阎兴隆,李景镇. 全息相干快门超高速摄影初步研究[J]. 高速摄影与光子学,1990,19(3):264-269.
YAN X L, LI J ZH. Primary study of ultra-high-speed photography with holographic coherence shutters[J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1990, 19(3):264-269. (in Chinese)
- [8] 谢洪波,徐萌萌,龚艳霞,等. 宽光谱超高速八分幅相机的光学系统设计[J]. 应用光学,2016,37(2):172-176.
XIE H B, XU M M, GONG Y X, *et al.*. Optical system design of wide-spectrum and ultra high-speed 8-frame framing camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2):172-176. (in Chinese)
- [9] 李剑,刘宁文,肖正飞,等. 可用于多幅纹影照相的超高速光电分幅相机光学系统设计[J]. 光电工程,2014,41(10):38-41.
LI J, LIU N W, XIAO ZH F, *et al.*. Optical system design of ultra high speed optic electronic framing camera used in shlieren experiment[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(10):38-41. (in Chinese)
- [10] 刘宁文,李剑,赵新才,等. 超高速光电分幅相机及应用[J]. 高压物理学报,2016,30(1):37-41.
LIU N W, LI J, ZHAO X C, *et al.*. An ultra-high-speed electro-optical framing camera and its application[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(1):37-41. (in Chinese)
- [11] 江孝国,王远,金光,等. 超高速高性能门控型三分幅相机[J]. 光子学报,2013,42(9):1065-1070.

- JIANG X G, WANG Y, JIN G, *et al.*. Three-frame framing camera with ultrahigh speed and high performance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(9):1065-1070. (in Chinese)
- [12] 单宝忠, 郭宝平, 牛憨笨. 多通道门选通纳秒分幅相机[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(12):1963-1968.
SHAN B ZH, GUO B P, NIU H B. Multi-channel nano-second framing camera with gate selection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12):1963-1968. (in Chinese)
- [13] 谢洪波, 祝世民, 龚艳霞, 等. 应用于数字高速成像的离轴光学系统设计[J]. *应用光学*, 2015, 36(2):194-198.
XIE H B, ZHU SH M, GONG Y X, *et al.*. Design of off-axis optical system applied for digital high-speed imaging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2):194-198. (in Chinese)
- [14] Proof of the Scheimpflug principle[EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Scheimpflug_principle, 2015.
- [15] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014. (in Chinese)
LI X T, CEN ZH F. *Geometrical Optics Aberrations and Optical Design*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014. (in Chinese)

作者简介:



张天舒(1991—),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,2014年于浙江大学获得学士学位,主要从事光学设计方面的研究。E-mail:zhang_tian_shu@163.com



金光(1958—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1982年于长春光机学院获得学士学位,1991年、2001年于中科院长春光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事小卫星总体技术方面的研究。E-mail:jing@ciomp.ac.cn